

Антонов Э.И., докт. техн. наук, Грядущий К.В. (НИИГМ им.М.М.Федорова)

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЗУМПФОВОЙ НАСОСНО-ГИДРОЭЛЕВАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ ВОДОСТРУЙНЫМ АППАРАТОМ

У статті обґрунтований метод розрахунку режимів роботи зумпфових насосно-гідроелеваторних установок з високонапірним двоступінчастим водоструйним апаратом.

В статье обоснован аналитический метод расчета режимов работы зумпфовых насосно-гидроэлеваторных установок с высоконапорным двухступенчатым водоструйным аппаратом.

In the article grounded the analytical method of the work regime of the sump pump-hydro elevator units with high pressure two-step water-jet apparatus.

КС: *режимы работы, зумпфовый водоотлив, насосно-гидроэлеваторная установка, метод расчета, эквивалентная напорная характеристика.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В последние годы было обосновано применение высоконапорных двухступенчатых водоструйных аппаратов с целью выдачи просыпи и откачки притоков воды из глубоких зумпфов скиповых стволов шахт /1/. Одной из основных особенностей разработки таких аппаратов является необходимость выполнения в каждом конкретном случае индивидуальных расчетов установок, важной составной частью которых является непосредственное определение режимов их работы.

Анализ исследований и публикаций. Вопросы расчета режимов работы насосно-гидроэлеваторных установок были рассмотрены в ряде работ специалистов НИИГМ им.М.М.Федорова, к основным из которых можно отнести /2-6/. Анализ указанных работ показал, что для определения параметров режимов работы установок в целом наиболее завершенным и пригодным для практического использования является метод, предложенный ранее в /1,2/ для расчета установок с одноступенчатыми аппаратами, основанный на использовании эквивалентных напорных их характеристик.

Цель работы – обоснование зависимостей расчета режимов работы зумпфовой насосно-гидроэлеваторной установки с двухступенчатым аппаратом на основе дальнейшего развития метода расчета режимов, представленного в работах /2,3,6/, с учетом отдельных рекомендаций работ /4,5/.

Изложение основного материала. Расчет режимов работы рабочих насосов. С целью эффективного решения поставленной задачи, как и в /2/, прежде всего, установим в общем виде аналитическую зависимость характеристики внешней, в данном случае комбинированной, сети насоса. При этом положим, что имеется ряд n параллельно включенных ветвей (ниток) сети, в которую в общем случае могут входить напорные трубопроводы водоотлива, сопла водоструйных аппаратов с рабочими трубопроводами последних, а также другие трубопроводные гидролинии, предназначенные, например, для отбора воды на орошение. Одновременно принимаем, что отбор потоков воды во все указанные ветви осуществляется от одной и той же точки (сечения) на выходе из насоса водоотлива и движение жидкости в них отвечает квадратичному закону сопротивления. Это, с одной стороны, обуславливает равенство значений напора H_H на входе в каждую из ветвей, а с другой – позволяет характеристику указанных ветвей представить в виде следующей системы квадратичных зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} H_H &= H_{\Gamma_1} + R_1 Q_1^2; \\ H_H &= H_{\Gamma_2} + R_2 Q_2^2; \\ &\dots\dots\dots \\ H_H &= H_{\Gamma_n} + R_n Q_n^2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где H_H – напор насоса; $H_{\Gamma_1}, H_{\Gamma_2}, \dots, H_{\Gamma_n}$ – значения геометрической высоты нагнетания отдельных ветвей внешней сети установки; R_1, R_2, \dots, R_n – сопротивления отдельных ветвей сети; Q_1, Q_2, \dots, Q_n – расходы в отдельных ветвях рассматриваемой сети.

Система уравнений (1) установлена, исходя из допущения (условия) о том, что на выходе из каждой ветви имеет место одинаковое значение давления, равное атмосферному. Это условие в полной мере может относиться и к истечению рабочего потока из сопла аппарата, что предполагает выполнение расчета установки при условии нулевого подпора на его всасе. Принятое допущение отвечает реальным условиям эксплуатации установок, поскольку даже при заметной разнице по высоте размещения выходных сечений рассматриваемых ветвей влияние его на величину давления на всасе весьма незначительно. Решая каждое из уравнений системы (1) относительно соответствующей подачи, получаем, что

$$Q_1 = \sqrt{\frac{H_H - H_{\Gamma_1}}{R_1}}; \quad Q_2 = \sqrt{\frac{H_H - H_{\Gamma_2}}{R_2}}; \quad \dots \quad Q_n = \sqrt{\frac{H_H - H_{\Gamma_n}}{R_n}}. \quad (2)$$

С учетом того, что суммарная подача насоса (насосов) равна

$$Q_H = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n,$$

можно записать, что

$$Q_H = \sqrt{\frac{H_H - H_{\Gamma_1}}{R_1}} + \sqrt{\frac{H_H - H_{\Gamma_2}}{R_2}} + \dots + \sqrt{\frac{H_H - H_{\Gamma_n}}{R_n}}. \quad (3)$$

Полученную зависимость (3) следует считать основным уравнением рассматриваемой комбинированной (сложной) внешней сети, устанавливающим точное соотношение между подачей насоса Q_H и напором H_H . Однако, вследствие того, что напор H_H в (3) записан в неявном виде, в общем случае выражение (3) исключает возможность непосредственного получения напорной характеристики сети в виде зависимости $H_H(Q_H)$. Дальнейшее решение задачи в общем случае можно было бы вести в направлении разработки метода преобразования зависимости (3) в напорную характеристику вида $H_H(Q_H)$, использование которой обеспечивало бы требуемую точность расчета параметров режимов работы установки. (Исходя из опыта, накопленного в области расчета режимов работы водоотливных установок /7/, погрешность расчета подачи насоса Q_C и расходов в отдельных ветвях сети не превышает 1%). Однако в данном конкретном случае решение задачи существенно упрощается благодаря результатам исследований, полученным в работе /6/. На основе их использования обеспечивается возможность обоснованного выбора параметров установки: напора H_H и подачи Q_H , а также, что особенно важно, требуемых при этом значений подпоров: $H_{П1}$ – на всасе первой ступени; $H_{П2}$ – на входе второй. Именно благодаря этому зависимость (3) может быть использована в основном для расчета на заключительном этапе разработки аппарата и установки в целом. Вполне обоснованным будет в данном случае использовать более простой подход к расчету – численный метод последовательных приближений.

В этой связи целесообразно теперь рассмотреть схему зумпфовой насосно-струйной установки с двухступенчатым водоструйным аппаратом, представленную на рис. 1. Установка включает: рабочий насос 1, напорный трубопровод 2, двухступенчатый аппарат с нижней, первой, ступенью 3 и верхней, второй, ступенью 4, рабочий трубопровод 5 и напорные трубопроводы: 6 – за первую ступенью 3, 7 – за второй ступенью 4.

После ввода насоса 1 в работу имеет место одновременная подача рабочих потоков Q_{P1} и Q_{P2} соответственно в сопла нижней 3 и верхней 4 ступеней аппарата. В результате ввода в работу

последних осуществляются забор водопритока из нижней, водосборной, части зумпфа 8 с расходом Q_{BC} , подача его от первой ступени ко второй с суммарным расходом $Q_{BC} + Q_{P1}$ и дальнейшее транспортирование потока после второй ступени с суммарным расходом $Q_{VCT} = Q_{BC} + Q_{P1} + Q_{P2}$.

Для обоснования зависимостей численного расчета режимов работы установки запишем выражение характеристики рабочего насоса, приведенной к точке М – точке разделения потоков Q_{P1} и Q_{P2} .

Для этого, аналогично /6/, из характеристики насоса

$$H = H_0 + A Q_P - B Q_P^2$$

необходимо вычесть характеристику общего трубопровода 10, по которому подается суммарный поток с расходом Q_P :

$$H = -H_{Г2} + R_{ТР.М} Q_P^2.$$

В результате получаем, что

$$H_{HP} = H_0 + H_{Г2} + A Q_P - (B + R_{ТР.М}) Q_P^2, \quad (4)$$

где H_{HP} – приведенный напор насоса; $H_{Г2}$ – превышение уровня воды в водосборнике 9 над точкой М – точкой разделения потоков рабочей жидкости; $R_{ТР.М}$ – сопротивление общего трубопровода 5, по которому подается суммарный рабочий поток с расходом Q_P (до точки М – разделения рабочих потоков). При этом принимаем, что отметка точки М по высоте отвечает отметке плоскости среза сопла верхнего аппарата 4. Кроме того, весьма важно учесть, что на практике нередко отбор рабочих потоков будет вестись от насосов со сниженными характеристиками, которые можно выразить зависимостью /7/

$$H_H = \phi_{CH} (H_0 + A Q_P - B Q_P^2), \quad (5)$$

где ϕ_{CH} – коэффициент снижения характеристики, принимаемый в диапазоне 0,95...0,8.

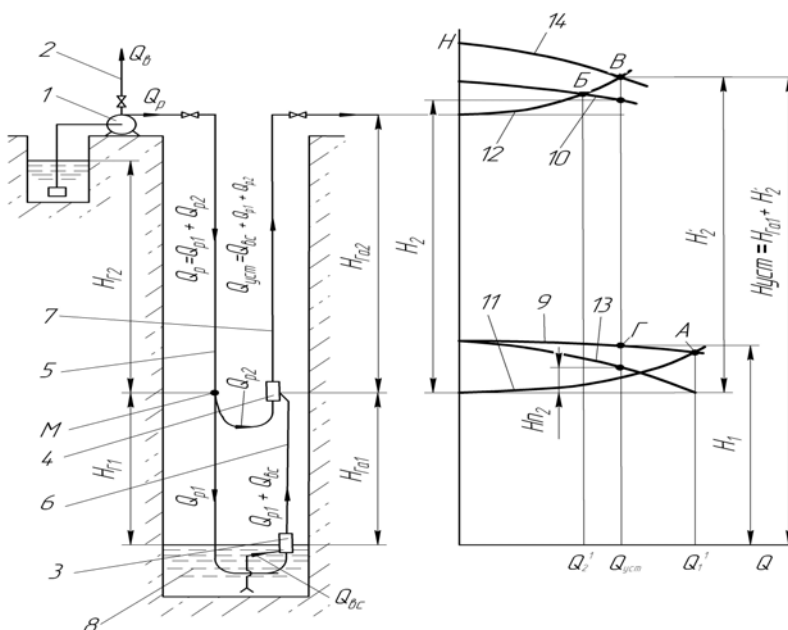


Рис. 1. Схема насосно-гидроэлеваторной установки с двухступенчатым аппаратом и графическое определение параметров режимов его работы соответственно, в сопла первой, нижней, 3 и второй, верхней, 4 ступеней аппарата

аппарата, по крайней мере, на входе в верхний аппарат, должен поддерживаться подпор не менее определенной величины. Отсюда следует, что для установки с двухступенчатым аппаратом необходимо выполнить корректировку выражения (3), представив его в следующем виде:

Далее выражение (3) для рассматриваемого случая (запитывания рабочим потоком двухступенчатого аппарата, расположенного ниже рабочего насоса), требует определенной корректировки. В системе зависимостей (1), записанной для общего случая, все значения геометрической высоты отдельных ветвей внешней сети установки представлены со знаком «+». С учетом расположения сопел аппарата ниже насоса для данного частного случая перед указанными параметрами знак должен быть изменен на «-». Из результатов выполненных исследований /1/ на входе в ступени

$$Q_P = \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} + H_{\Gamma 1} - H_{\text{П1}}}{\Sigma R_1}} + \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} - H_{\text{П2}}}{\Sigma R_2}}, \quad (6)$$

в котором приняты следующие зависимости для расчета сопротивлений рабочих гидролиний аппаратов:

нижний аппарат:

$$\Sigma R_1 = R'_1 + R_{C1}, \quad (7)$$

где R'_1 – сопротивление участка рабочего трубопровода 11 нижнего аппарата, расположенного ниже точки разделения потоков; а R_{C1} – сопротивление сопла нижнего аппарата;

верхний аппарат:

$$\Sigma R_2 = R'_2 + R_{C2}, \quad (8)$$

где R_{C2} – сопротивление сопла верхнего аппарата 4; R'_2 – сопротивление короткого участка рабочего трубопровода верхнего аппарата, размещенного между точкой разделения рабочих потоков (точка М) и соплом аппарата. В расчетах можно принимать $R'_2 \approx 0$. Кроме того, в выражении (6) приняты следующие обозначения: $H_{\text{П1}}$, $H_{\text{П2}}$ – величины подпора (или разрежения) на входе в первую и вторую ступени. (Для основного расчетного варианта можно принять $H_{\text{П1}} \approx 0$); $H_{\Gamma 1}$ – превышение точки М (рис.1) над плоскостью среза сопла первой ступени 3 аппарата.

Решая уравнение (4) относительно подачи Q_P и приравнявая его выражению (6), можно записать, что

$$\frac{A + \sqrt{A^2 - 4(B + R_{\text{ТР}})(H_{\text{ПР}} - H_0 - H_{\Gamma 2})}}{2(B + R_{\text{ТР}})} = \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} + H_{\Gamma 1}}{\Sigma R_1}} + \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} - H_{\text{П2}}}{\Sigma R_2}}. \quad (9)$$

При отборе рабочих потоков от насоса 1 со сниженной напорной характеристикой с учетом выражения (4) вместо зависимости (9) целесообразно использовать следующее равенство:

$$\begin{aligned} \frac{\phi_{\text{СН}} A + \sqrt{\phi_{\text{СН}}^2 A^2 - 4(\phi_{\text{СН}} B + R_{\text{ТР}})(H_{\text{ПР}} - \phi_{\text{СН}} H_0 - H_{\Gamma 2})}}{2(\phi_{\text{СН}} B + R_{\text{ТР}})} = \\ = \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} + H_{\Gamma 1}}{\Sigma R_1}} + \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} - H_{\text{П2}}}{\Sigma R_2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Данное уравнение решается с помощью метода последовательных приближений. После установления величины $H_{\text{ПР}}$ находятся значения Q_{P1} и Q_{P2} :

$$\begin{aligned} Q_{P1} &= \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} + H_{\Gamma 1}}{\Sigma R_1}}; \\ Q_{P2} &= \sqrt{\frac{H_{\text{ПР}} - H_{\text{П2}}}{\Sigma R_2}}, \end{aligned} \quad (11)$$

а также суммарная подача Q_P :

$$Q_P = Q_{P1} + Q_{P2}. \quad (12)$$

Как следует из вышеизложенного, предложенное в данном разделе представление характеристики системы рабочих гидролиний аппарата в виде уравнения сложной внешней сети (6) и приведение напорной характеристики насоса (4) к точке М (рис.1) разделения рабочих потоков позволяют достаточно просто и надежно определить все необходимые расчетные параметры установки «рабочий насос-система рабочих гидролиний двухступенчатого аппарата».

После установления величины $H_{\text{ПР}}$, Q_{P1} и Q_{P2} определяются значения напоров рабочих потоков перед аппаратами:

для нижней ступени:

$$H_{P1} = H_{\text{ПР}} + H_{\Gamma 1} - R'_1 Q_{P1}^2;$$

для верхней ступени:

$$H_{P2} = H_{ПР} - R'_2 Q_{P2}^2.$$

Как правило, $R'_2 \approx 0$, поэтому H_{P2} принимается равным $H_{ПР}$.

Расчет режимов работы двухступенчатого водоструйного аппарата.

Установим основные зависимости для расчета режимов работы системы «двухступенчатая гидроэлеваторная установка – напорный трубопровод». Определенная принципиальная сложность расчета такой системы обусловлена тем, что, в отличие, например, от ближайшего известного аналога – схемы водоотливной установки с последовательно включенными насосами (расположенными на разных горизонтах шахты) в рассматриваемом случае суммарные подачи (смешанного) потока за нижней и верхней ступенями (при их нормальной совместной работе) не равны между собой. После первой ступени имеет место расход потока, равный сумме $Q_{P1} + Q_{BC}$, а после второй он равен сумме $Q_{VCT} = Q_{P1} + Q_{BC} + Q_{P2}$, т.е. превышает первый на величину Q_{P2} . Решение рассматриваемой задачи становится возможным благодаря использованию ранее обоснованного в [2,3] принципа представления преобразованных, эквивалентных, напорных характеристик аппаратов. При этом для дальнейшего анализа принимаем следующие условия: $Q_{P1} = const$; $Q_{P2} = const$; $Q_P = const$.

Для верхней ступени 4 непосредственно используем установленную в [2] зависимость в следующем виде:

$$h_2 = \phi_1^2 \frac{1}{n_2^2} \left[2\phi_2 + \left(2\phi_2 - \frac{1}{\phi_4^2} \right) \frac{(\bar{Q}_{VCT} - 1)^2}{n_2^2 - 1} - (2 - \phi_3^2) \frac{1}{n_2^2} \bar{Q}_{VCT}^2 \right], \quad (13)$$

где $n_2 = d_{K2} / d_{C2}$; d_{K2} ; d_{C2} – диаметры камеры смешения и сопла верхнего аппарата.

Преобразуя выражение (13), аналогично [2] получаем эквивалентную напорную характеристику верхней ступени аппарата в виде

$$H_2 = H_{P2} (H_{0a2} + A_{a2} \frac{Q_{VCT}}{Q_{P2}} - B_{a2} \frac{Q_{VCT}^2}{Q_{P2}^2}), \quad (14)$$

где H_2 , H_{P2} – напоры смешанного и рабочего потоков в верхнем аппарате; Q_{VCT} , Q_{P2} – расход смешанного потока за верхним аппаратом и расход рабочей жидкости в нем;

$$H_{0a2} = \phi_1^2 \frac{1}{n_2^2} \left[2\phi_2 + \frac{1}{n_2^2 - 1} \left(2\phi_2 - \frac{1}{\phi_4^2} \right) \right];$$

$$A_{a2} = \frac{2\phi_1^2}{n_2^2 (n_2^2 - 1)} \left(\frac{1}{\phi_4^2} - 2\phi_2 \right);$$

$$B_{a2} = \phi_1^2 / n_2^4 \left[\frac{n_2^2}{\phi_4^2 (n_2^2 - 1)} - \frac{2\phi_2 n_2^2}{n_2^2 - 1} + 2 - \phi_3^2 \right].$$

Как видно, в данном случае использовано соотношение (14) в несколько преобразованном виде (с введением индекса 2):

$$U_2 = \frac{Q_{VCT} - Q_{P2}}{Q_{P2}} = \bar{Q}_{VCT} - 1, \quad (15)$$

где $\bar{Q}_{VCT} = Q_{VCT} / Q_{P2}$.

Для первой (нижней) ступени 3 расход смешанного потока является меньшим такового на выходе второй ступени:

$$Q_{BC} + Q_{P1} < Q_{VCT}.$$

Поэтому указанный принцип преобразования характеристик используем следующим образом:

$$U_1 = \frac{(Q_{BC} + Q_{P1}) - Q_{P1}}{Q_{P1}}. \quad (16)$$

Прибавляя и вычитая величину Q_{P2} в числителе (16), запишем, что

$$U_1 = \frac{Q_{BC} + Q_{P1} + Q_{P2} - Q_{P1} - Q_{P2}}{Q_{P1}},$$

или, поскольку

$$Q_{VCT} = Q_{BC} + Q_{P1} + Q_{P2},$$

получим следующее выражение для расчета U_1 :

$$U_1 = \frac{Q_{VCT} - Q_{P1} - Q_{P2}}{Q_{P1}}. \quad (17)$$

Принимая обозначение $Q_{P2}/Q_{P1} = \kappa$, можно записать, что

$$U_1 = \bar{Q}_{VCT} - 1 - \kappa = \left(\frac{Q_{VCT}}{Q_{P1}} - 1 - \kappa \right). \quad (18)$$

Преобразуя уравнение (13) с учетом того, что $U = \frac{Q_{VCT}}{Q_{P1}} - 1 - \kappa$ и $n_1 = d_{K1} / d_{C1}$, получим

уравнение эквивалентной напорной характеристики нижней ступени установки в виде:

$$H_1 = H_{P1} \left(H_{0a1} + A_{a1} \frac{Q_{VCT}}{Q_{P1}} - B_{a1} \frac{Q_{VCT}^2}{Q_{P1}^2} \right), \quad (19)$$

где H_1, H_{P1} – напоры смешанного и рабочего потоков в нижнем аппарате; Q_{VCT}, Q_{P1} – расход смешанного и рабочего потоков в нижнем аппарате;

$$H_{0a1} = \phi_1^2 \frac{1}{n_1^2} \left[2\phi_2 + \left(2\phi_2 - \frac{1}{\phi_4^2} \right) \frac{(1+\kappa)^2}{n_1^2 - 1} - (2 - \phi_3)^2 \frac{\kappa^2}{n_1^2} \right];$$

$$A_{a1} = \phi_1^2 \frac{1}{n_1^2} \left[(2 - \phi_3)^2 \frac{2\kappa}{n_1^2} - 2 \frac{1+\kappa}{n_1^2 - 1} \left(2\phi_2 - \frac{1}{\phi_4^2} \right) \right];$$

$$B_{a1} = \phi_1^2 \frac{1}{n_1^2} \left[(2 - \phi_3)^2 \frac{1}{n_1^2} - \left(2\phi_2 - \frac{1}{\phi_4^2} \right) \frac{1}{n_1^2 - 1} \right];$$

где $n_1 = d_{K1} / d_{C1}$; $d_{K1}; d_{C1}$ – диаметры камеры смешения и сопла нижнего аппарата.

В итоге, таким образом, обе характеристики (14) и (19) приведены к одной и той же переменной, а именно: к расходу суммарного потока на выходе аппарата – Q_{VCT} , что позволяет теперь использовать как графический, так и аналитический методы расчета режимов работы установки.

В связи с изложенным необходимо также отметить, что в работе /4/ суммарная напорная характеристика двухступенчатого аппарата представлена как непосредственная сумма напоров нижней и верхней ступеней. Однако, как следует из вышеприведенного, это допустимо только при условии сложения их в точках с одинаковой подачей Q_{VCT} , что в работе /4/ не акцентировано. В частности, в связи с этим необходимо приведение напорных характеристик ступеней аппарата к единому параметру по подаче, в качестве которого рационально принять подачу Q_{VCT} .

С учетом этих соображений аналитические выражения напорных характеристик промежуточного трубопровода (между первой и второй ступенями) и напорного трубопровода за второй ступенью можно соответственно представить в виде зависимостей

$$H_{TP.1} = H_{Ga1} + R_1(Q_{VCT} - Q_{P2})^2; \quad (20)$$

$$H_{TP.2} = H_{Ga2} + R_2 Q_{VCT}^2, \quad (21)$$

где $H_{Ga1}, H_{Ga2}, R_1, R_2$ – геометрическая высота нагнетания и сопротивления напорных трубопроводов первой и второй ступеней аппарата.

Рассматривая представленные на рис. 1 характеристики установки, необходимо также отметить следующее. При самостоятельной (условной) работе аппаратов 3 и 4 (рис. 1) на свои

напорные трубопроводы 6 и 7 они бы обеспечивали режимы работы, соответственно отвечающие точке А – с подачей Q'_1 и точке Б – с подачей Q'_2 . Указанные точки находятся на пересечении соответствующих эквивалентных напорных характеристик 9 и 10 аппаратов и соответственно характеристики 11 и 12 трубопроводов 6 и 7. Как и в случае последовательной работы насосов, в рассматриваемой установке при правильном выборе указанных характеристик необходимо, чтобы обеспечивалось условие $Q'_1 > Q_{VCT} > Q'_2$.

Для определения характеристики подпора на входе верхнего аппарата 4 необходимо напорную характеристику 9 нижнего аппарата привести к отметке, отвечающей плоскости среза сопла верхнего аппарата 4. С этой целью из напорной характеристики 9 нижнего аппарата 4 необходимо вычесть соответствующие ординаты характеристики трубопровода 11. Установленная таким путем приведенная характеристика, представленная кривой 13 на рис. 1, одновременно является характеристикой подпора на входе верхнего аппарата 4. Суммируя напорную характеристику 10 верхнего аппарата 4 с указанной характеристикой 13 подпора, получаем приведенную эквивалентную характеристику 14 второй ступени аппарата, пересечение которой с характеристикой 12 напорного трубопровода (пульпопровода) 7 верхнего аппарата дает расчетный режим работы установки в точке В, определяющей подачу установки Q_{VCT} . Расчетный режим работы нижнего аппарата и подпор $H_{П2}$ будут также отвечать подаче Q_{VCT} – точка Г. Расчетная величина подпора характеризуется отрезком $H_{П2}$.

Выразим аналитически характеристику подпора на входе верхнего аппарата. Принимая при этом, как и в [2], условие о том, что уровень воды в зумпфе отвечает плоскости среза сопла нижней подкачивающей ступени 3 (условие нулевого подпора на ее всасе), можно записать, что

$$H_{П} = H_1(Q_{VCT}) - H_{TP1}(Q_{VCT})$$

или в развернутом виде

$$H_{П} = H_{P1} \left(H_{0a1} + A_{a1} \frac{Q_{VCT}}{Q_{P1}} - B_{01} \frac{Q_{VCT}^2}{Q_{P1}^2} \right) - H_{Гa1} - R_1 (Q_{VCT} - Q_{P2})^2. \quad (22)$$

Напорную характеристику второй ступени 4 с учетом влияния подпора можно записать в виде следующей зависимости, в которой напор H_2 является функцией одной переменной – расхода смешанного потока Q_{VCT} на выходе из аппарата:

$$H_2 = H_{P2} \left(H_{0a2} + A_{a2} \frac{Q_{VCT}}{Q_{P2}} - B_{a2} \frac{Q_{VCT}^2}{Q_{P2}^2} \right) + H_{P1} \left(H_{0a1} + A_{a1} \frac{Q_{VCT}}{Q_{P1}} - B_{a1} \frac{Q_{VCT}^2}{Q_{P1}^2} \right) - H_{Гa1} - R_1 (Q_{VCT} - Q_{P2})^2. \quad (23)$$

Решая систему уравнений (23) и (21), получаем следующее квадратное уравнение относительно Q_{VCT} :

$$\left(\frac{H_{P2} \bar{B}_{a2}}{Q_{P2}^2} + \frac{H_{P1} \bar{B}_{a1}}{Q_{P1}^2} + R_2 + R_1 \right) Q_{VCT}^2 - \left(\frac{H_{P2} \bar{A}_{a2}}{Q_{P2}} + \frac{H_{P1} \bar{A}_{a1}}{Q_{P1}} + 2R_1 Q_{P2} \right) Q_{VCT} - (H_{P2} \bar{H}_{0a2} + H_{P1} \bar{H}_{0a1} - H_{Гa1} - H_{Гa2} - R_1 Q_{P2}^2) = 0. \quad (24)$$

Решая последнее уравнение, получаем, что

$$Q_{VCT} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (25)$$

где

$$a = \frac{H_{P2} \bar{B}_{a2}}{Q_{P2}^2} + \frac{H_{P1} \bar{B}_{a1}}{Q_{P1}^2} + R_2 + R_1;$$
$$b = - \left(\frac{H_{P2} \bar{A}_{a2}}{Q_{P2}} + \frac{H_{P1} \bar{A}_{a1}}{Q_{P1}} + 2R_1 Q_{P2} \right);$$
$$c = - \left(H_{P2} \bar{H}_{0a2} + H_{P1} \bar{H}_{0a1} - H_{Ga1} - H_{Ga2} - R_1 Q_{P2}^2 \right).$$

После определения величины Q_{VCT} с помощью (25) появляется возможность для установления всех остальных расчетных величин: подпора H_{II} на всасе верхней ступени, подачи аппарата – Q_{BC} , общего его напора и др.

Выводы.

1. Установлена характеристика системы рабочих гидрولينей двухступенчатого аппарата, включающих рабочие трубопроводы и сопла его ступеней, в виде уравнения сложной внешней сети рабочего запитывающего аппарат насоса. Последнее в совокупности с использованием аналитической характеристики рабочего насоса, преобразованное с учетом эксплуатационного ее снижения и приведения к точке разделения рабочих потоков, дает возможность расчетного определения рабочих параметров гидравлической системы «рабочий насос – рабочие гидрولينей двухступенчатого аппарата».

2. Обоснован метод расчета режимов работы двухступенчатого водоструйного аппарата, базирующийся на использовании установленной в [2,3] эквивалентной напорной характеристики ступеней аппарата, что, в свою очередь, позволило получить зависимость эквивалентной напорной характеристики (23) двухступенчатого аппарата в целом в виде функций одной переменной – расхода смешанного потока Q_{VCT} на его выходе.

3. Установленный комплекс взаимосвязанных между собой зависимостей обеспечивает полное расчетное определение параметров режимов работы насосно-гидроэлеваторной установки с двухступенчатым аппаратом и придает расчету ясный физический смысл, присущий расчету насосных, в том числе водоотливных установок.

Литература

1. Антонов Э.И. Высоконапорные гидроэлеваторные установки для очистки зумпфов / Э.И.Антонов, Б.А.Грядущий, К.В. Грядущий и др. // Уголь Украины. –2010. – №5. –С.12-15.
2. Антонов Э.И. Схема и оценка параметров шахтной водоотливной установки с насосно-струйной подкачивающей системой организации подпора / Э.И.Антонов // Горная механика: сб.науч.трудов. – Донецк: НИИГМ им. М.М.Федорова, 1991. – С.126-148.
3. Грядущий К.В. Расчет режимов работы зумпфовой насосно-гидроэлеваторной установки / К.В. Грядущий // Проблемы експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: сб. научн. тр. – Вып.104-105. – Донецк: НИИГМ им. М.М.Федорова, 2010-2011. – С.315-325.
4. Галанин А.Н. Расчет режимов работы двухступенчатого водоструйного аппарата / А.Н.Галанин, Э.И. Антонов, Ю.В. Тимохин // Уголь Украины. – 1999. – №9. – С.36-38.
5. Тимохин Ю.В. Расчет режима работы водоотливной установки со струйным насосом / Ю.В.Тимохин, В.А.Романов, Л.И. Кошкальда и др. // Горная механика: сб.науч.трудов НИИГМ им.М.М.Федорова. – 1992. – – Донецк: НИИГМ им. М.М.Федорова, 1992. – С.77-82.
6. Антонов Э.И. Влияние высоты всасывания зумпфовых водоструйных аппаратов на их рабочие параметры / Э.И.Антонов, К.В.Грядущий // Проблемы експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: сб. научн. тр. – Вып.102-103. – Донецк: НИИГМ им. М.М.Федорова, 2008-2009. – С.136-150.
7. Методика расчета параллельной работы насосов водоотлива шахт, имеющих большие притоки: РТМ-07.02.010-78: 2-я ред. / ВНИИГМ им. М.М.Федорова. – Донецк: ВНИИГМ им.М.М.Федорова., 1979. – 91с.

*Статья рекомендована к публикации
канд. техн. наук Лободой В.В.*